

MECHANIKA

CZASOPISMO TECHNICZNE

TECHNICAL TRANSACTIONS

MECHANICS

WYDAWNICTWO

POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ

8-M/2012

ZESZYT 22

ROK 109

ISSUE 22

YEAR 109

ARTUR BOROWIEC, LEONARD ZIEMIAŃSKI\*

## ZASTOSOWANIE SZTUCZNYCH SIECI NEURONOWYCH DO IDENTYFIKACJI USZKODZENIA W BELKACH – BADANIA NUMERYCZNE I DOŚWIADCZALNE

## THE APPLICATION OF ARTIFICIAL NEURAL NETWORKS IN THE IDENTIFICATION OF DAMAGE IN BEAMS – NUMERICAL AND EXPERIMENTAL STUDIES

### Streszczenie

W pracy przedstawiono zastosowanie sztucznych sieci neuronowych (SSN) do identyfikacji uszkodzenia (położenie, wielkość) w belkach laboratoryjnych. Ocena uszkodzenia belek polega na analizie zmian częstotliwości rezonansowych wywołanych dodatkową zmieniającą położenie masą. Metoda nie wymaga znajomości parametrów modalnych belki nieuszkodzonej.

*Słowa kluczowe: sztuczne sieci neuronowe, identyfikacja uszkodzenia, analiza modalna*

### Abstract

This paper presents the application of Artificial Neural Networks (ANN) in the identification of damage (location, extent) in simple laboratory beam structure. The assessment of the state of a beams relies on the comparison of the structure eigenfrequencies obtained from the systems with additional masses placed in different nodes without knowledge of the natural frequencies of undamaged structures.

*Keywords: artificial neural networks, damage identification, modal analysis*

\* Dr inż. Artur Borowiec, prof. dr hab. inż. Leonard Ziemiański, Katedra Mechaniki Konstrukcji, Wydział Budownictwa i Inżynierii Środowiska, Politechnika Rzeszowska.

## Oznaczenia

- $l_c$  – położenie uszkodzenia, mm
- $h_c$  – wielkość uszkodzenia (głębokość), mm
- $M$  – dodatkowa masa, g
- $l_m$  – położenie dodatkowej masy, mm
- ${}^m f_n$  –  $n$ -ta obliczona częstotliwość rezonansowa modelu z masą w punkcie  $m$ , Hz
- ${}^m \tilde{f}_n$  –  $n$ -ta pomierzona częstotliwość rezonansowa modelu z masą w punkcie  $m$ , Hz

## 1. Wstęp

Tworzenie i wdrażanie metod oceny aktualnego stanu budowli jest przedmiotem badań prowadzonych w wielu ośrodkach naukowych. Obecnie już na etapie projektowania odpowiedzialnych obiektów uwzględnia się sposób ich monitorowania. Kontrola takich obiektów odbywa się w sposób ciągły lub okresowy. Monitorowanie konstrukcji wykonuje się dla całości konstrukcji (metody globalne) lub tylko dla jej elementów (metody lokalne). Ocena stanu konstrukcji może odbywać się etapowo. Do wskazania obszarów uszkodzeń można zastosować metody oceny globalnej, po czym szczegółowo ocenić ją we wskazanym obszarze metodami lokalnymi. Niektóre procedury identyfikacji uszkodzeń wymagają ingerencji w strukturę elementów w celu oceny ich kondycji. W procesie diagnozowania i prognozowania stanu konstrukcji, czyli zdolności funkcjonowania i zachowania integralności konstrukcji przez cały okres jej użytkowania, znaczące miejsce zajmują badania nieniszczące, a wśród nich analiza modalna. Analiza modalna, rozwijana w ostatnich 30 latach, stanowi alternatywę dla kosztownych badań wizualnej inspekcji. Większość prowadzonych prac koncentruje się na rozwoju tradycyjnej metody identyfikacji modalnej i dostrajaniu modeli numerycznych z wykorzystaniem urządzeń stosowanych od lat 80. (akcelerometry mocowane do konstrukcji). W tym samym czasie olbrzymi postęp w wielu obszarach inżynierii otwiera nieznane dotychczas możliwości dla analizy modalnej. Nowe rodzaje bezprzewodowych czujników wbudowywanych w monitorowany obiekt oraz pomiary bezkontaktowe pozwalają poprawić jakość pomiarów. Wzrost mocy obliczeniowej komputerów, szybkości transferu danych oraz możliwości ich przechowywania umożliwiają obecnie zastosowanie bardzo rozległej sieci czujników na monitorowanym obiekcie. Dodatkowo rozwój nowych algorytmów w obszarach przetwarzania i interpretowania danych wraz z technikami sztucznych inteligencji pozwalają na zastosowanie procedur monitorowania konstrukcji w czasie rzeczywistym. Niestety, w praktyce inżynierom brakuje skutecznych narzędzi do przetworzenia tak dużych ilości informacji. Ponadto większość monitorowanych konstrukcji podlega wpływom oddziaływań otoczenia, co może być błędnie interpretowane przez system diagnostyczny. Celowe okazuje się zatem poszukiwanie tanich metod globalnej oceny konstrukcji, a zarazem łatwych do powszechnego zastosowania w diagnostyce.

Aktywny monitoring części lub całości konstrukcji inżynierskich jest jednym z wymogów nowoczesnych rozwiązań technicznych. Wyznaczenie wartości parametrów modalnych budowli oraz ich zmian jest jedną z podstawowych metod diagnostycznych. Rozwój metod bazujących na analizie modalnej jest widoczny w licznych publikacjach związanych z prowadzeniem pomiarów dynamicznych na obiektach budowlanych. Zestawienie i porównanie metod identyfikacji uszkodzeń można znaleźć w przeglądowych pracach [3, 5]. Znajomość

parametrów dynamicznych jest istotna w kontekście wpływów sejsmicznych i parasejsmicznych na konstrukcje. Analiza tych oddziaływań na obiekty budowlane jest prowadzona także z zastosowaniem sztucznych sieci neuronowych [6]. Udoskonalanie metod diagnostycznych odbywa się z udziałem polskich naukowców. W pracy [4] do lokalizacji uszkodzenia metodą analizy modalnej wprowadzono dodatkowy parametr (masa, podpora) sterujący, zmieniający położenie na długości elementu. Większość metod lokalizacji uszkodzeń bazuje na parametrach modelu bez uszkodzeń jako stanu odniesienia. Natomiast analiza zmian częstości drgań własnych oraz ich pochodnych wyższych stopni [8] względem położenia masy umożliwia lokalizację uszkodzenia bez znajomości parametrów stanu wyjściowego.

Przedstawiona w niniejszej pracy metoda identyfikacji uszkodzeń wykorzystuje SSN do oceny tych zmian, co pozwala dodatkowo rozróżnić wielkość zlokalizowanych uszkodzeń. W pracy poszukiwano koniecznej, minimalnej liczby położów jednej dodatkowej masy, potrzebnej do skutecznej identyfikacji uszkodzenia. Przedstawiono wyniki badań przeprowadzonych dla dwóch schematów statycznych belek: wspornikowej i swobodnie podpartej z przewieszeniem. Modele laboratoryjne belek wykonano z płaskownika stalowego, a jego uszkodzenia zrealizowano przez nacięcie prostopadle do osi belki.

## 2. Metodyka i przedmiot badań

Wprowadzenie do powszechnego stosowania nowych metod badania elementów konstrukcji wymaga przeprowadzenia weryfikacji analitycznych, numerycznych i doświadczalnych (laboratoryjnych). Ich efektem jest opracowanie procedury praktycznego zastosowania metody z uwzględnieniem jej przeznaczenia, zakresu i kosztu. Celem prowadzonych badań było opracowanie takiej właśnie procedury dla metody identyfikacji uszkodzeń w elementach konstrukcji, bazującej na zmianach parametrów modalnych wywołanych masą zmieniającą położenie. Podstawową zaletą prezentowanego podejścia jest ocena stanu elementów konstrukcji bez znajomości ich stanu początkowego. Dotychczas metodę testowano na modelach numerycznych, a weryfikacje przeprowadzono na modelach laboratoryjnych. Bazując na modelach dyskretnych, przeprowadzono ocenę zmian parametrów modalnych związanych z uszkodzeniem oraz dodatkową masą [2]. Efektem tych doświadczeń było częściowe określenie dokładności i efektywności wspomnianej metody, umożliwiającej lokalizację uszkodzenia w modelu numerycznym i laboratoryjnym. Kontynuacją tych weryfikacji jest niniejszy artykuł. W pracy zastosowano SSN jako narzędzie do rozróżniania (klasyfikacji) uszkodzeń w przykładach, w których określano jednocześnie ich położenie oraz wielkość (głębokość). Użyte modele laboratoryjne analizowane były pod kątem dynamicznego zachowania elementów belkowych. Badaniom poddano elementy stalowe o liniowej charakterystyce odpowiedzi, bez sprzężeń, dla których można zastosować liniową (klasyczną) analizę modalną. Niski współczynnik tłumienia dla stali pozwolił wykorzystać model o słabym tłumieniu. W trakcie analizy uwzględniano tylko jedno uszkodzenie na długości elementu. W symulacjach numerycznych prowadzonych przez autora [1] poddano ocenie wpływ wielkości masy w stosunku do masy modelu oraz rozdzielczości pomiarowej na dokładność identyfikacji uszkodzeń.

## 2.1. Analiza dynamiczna

Weryfikacja metody na modelu laboratoryjnym wymaga wyznaczenia doświadczalnie parametrów modelu modalnego. W tym celu zastosowano eksperymentalną analizę modalną, przeprowadzając pomiar dynamicznej odpowiedzi belek laboratoryjnych na wymuszenia impulsowe. W badaniach skoncentrowano się na identyfikacji częstotliwości rezonansowych dla badanych belek. Wyznaczono je dla różnych położeń i wielkości uszkodzenia, przy zmieniającej położenie dodatkowej masie. Do pomiaru odpowiedzi wykorzystano aparaturę Katedry Mechaniki Konstrukcji Politechniki Rzeszowskiej. W skład zestawu wchodziło:

- 8 czujników przyspieszeń PCB,
- wzбудnik elektrokinematyczny,
- wielokanałowy analizator sygnału Scadas III,
- komputer PC z oprogramowaniem LMS CADA-X do akwizycji i przetwarzania danych pomiarowych.

Pomierzone przebiegi przyspieszeń z punktów pomiarowych w dziedzinie czasu przetwarzano na widma drgań w dziedzinie częstotliwości z wykorzystaniem szybkiej transformacji Fouriera. Otrzymane charakterystyki amplitudowo-częstotliwościowe zapisywano do dalszej analizy. Przetwarzanie danych pomiarowych wykonywano w programie Matlab, gdzie identyfikowano parametry modalne belek.

## 2.2. Sztuczne sieci neuronowe

Sztuczne sieci neuronowe są jedną z metod heurystycznych, zwanych też „miękkimi” metodami obliczeniowymi. Aktualnie SSN znajdują coraz szersze zastosowanie w wielu gałęziach nauki i techniki. Zainteresowanie nimi wynika przede wszystkim z ich praktycznych właściwości, dzięki którym możliwe stało się rozwiązywanie problemów trudnych do wyznaczenia metodami standardowymi [7]. Analizowany problem identyfikacji uszkodzeń, w proponowanym podejściu, mieści się w klasie zagadnień odwrotnych. Klasycznym, najczęściej stosowanym przykładem sieci jest jednokierunkowa sieć wielowarstwowa, zbudowana z neuronów ułożonych w warstwach. Każda sieć musi być poddana procesowi uczenia na wzorcach, tj. na zestawach przyporządkowanych sobie wzajemnie danych wejściowych i wyjściowych. Celem iteracyjnego procesu uczenia sieci jest adaptacyjny dobór wag synaptycznych i biasów, tak aby sieć zrealizowała odwzorowanie danych wejściowych  $\mathbf{X} = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$  w dane wyjściowe  $\mathbf{Y} = \{y_1, y_2, \dots, y_m\}$ . Zastosowanie ciągłych funkcji aktywacji umożliwia minimalizację funkcji celu metodami gradientowymi. W badaniach do identyfikacji uszkodzeń zastosowano dwuwarstwowe, jednokierunkowe sieci neuronowe ze wsteczną propagacją błędów. Zastosowano bardzo efektywny algorytm uczenia Levenberga–Marquardta. Część wzorców, nieużytych w procesie uczenia, wykorzystuje się w procesie testowania w celu oceny stopnia generalizacji sieci. Odpowiedź (wyjście) sieci jest zawsze obciążona pewnym błędem oszacowania (predykcji). Proces uczenia sieci oceniano za pomocą średniego błędów kwadratowego (MSE, ang. *Mean Squared Error*):

$$MSE = \frac{1}{P} \sum_{p=1}^P \sum_{i=1}^O \left( y_{ip} - \hat{y}_{ip} \right)^2 \quad (1)$$

gdzie  $P$  to liczba wzorców,  $O$  liczba wyjść sieci,  $\mathbf{Y}_p$  wektor odpowiedzi sieci, a  $\hat{\mathbf{Y}}_p$  to wektor wartości oczekiwanych. Inną miarą jakości nauczania sieci odwzorowywania wektorów wejściowych w wyjściowe, stosowaną w prowadzonych badaniach, był współczynnik determinacji, czyli kwadrat współczynnika korelacji liniowej  $r^2$ . Obliczenia z zastosowaniem SSN wykonywano w programie Matlab.

### 2.3. Belka wspornikowa

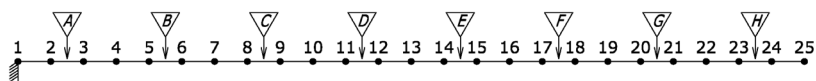
Badania dynamiczne zrealizowano dla belki wspornikowej wykonanej z płaskownika ze stali gat. S235JRG2 o wymiarach przekroju: wysokość  $H = 10$  mm, szerokość  $B = 40$  mm. Długość modelu laboratoryjnego wynosiła 1500 mm, przy czym 300 mm wykorzystano na zamocowanie modelu, a sam wspornik miał długość  $L = 1200$  mm. Uszkodzenie wykonano, nacinając belkę na całej szerokości prostopadle do osi wspornika. Stała długość nacięć wynosiła 1,2 mm. Głębokość  $h_c$  wykonywano skokowo co 1,0 mm w zakresie od 1,0 mm do 8,0 mm. Fragment modelu laboratoryjnego belki wspornikowej z zamontowanymi czujnikami i dołączanymi masami wraz z nacięciem przedstawiono na zdjęciu (rys. 1). Po serii pomiarów dla wszystkich głębokości i dla jednego z położen uszkodzenia (nacięcia) ubytek wypełniano spoiną i szlifowano.



Rys. 1. Fragment belki laboratoryjnej

Fig. 1. Part of laboratory beam

Belkę wspornikową podzielono umownie na 24 równe fragmenty o długości 50 mm. Pomiar realizowano dla ośmiu różnych położen nacięcia, które na rys. 2 oznaczono trójkątami z literami od A do H. Dodatkową, dołączoną za pomocą magnesu, masę przemieszczano po punktach oznaczonych na rys. 2 kropkami. Masę umieszczano w osi belki na górnej powierzchni w 23 punktach od 2 do 24.



Rys. 2. Schemat wykonywanych nacięć (trójkąty A–H) na belce

Fig. 2. Scheme of notch (triangles A–H) on laboratory beam

Nacięcia wykonywano w środku każdego z oznaczonych fragmentów belki wspornikowej. Dodatkowa, zmieniająca położenie, masa  $M$  (193 g) stanowiła 5,32% masy badanego elementu (3626 g). Wymuszenie impulsowe realizowano w osi belki w punkcie 24. W trakcie badań dla każdej wielkości uszkodzenia wykonano serie 24 pomiarów odpowiedzi konstruk-

cji: jeden pomiar dla układu bez masy oraz 23 pomiary dla układu z dodatkową masą. Oprócz tego dla wszystkich planowanych położen uszkodzenia zrealizowano dodatkowo jedną serię pomiarów przed wykonaniem nacięcia ( $h_c = 0$ ). Łącznie zaplanowano przeprowadzenie 1728 pomiarów na modelu: 9 serii po 24 pomiary dla ośmiu położen nacięcia (A–H). Ostatecznie zrealizowano 1680 pomiarów, gdyż dla dwóch najbliższych utwierdzeniu położen nacięcia (A, B), po nacięciu do 8 mm, belka uległa złamaniu pod ciężarem własnym. Wykonano 62 ( $6 \times 8 + 2 \times 7$ ) serie pomiarowe dla różnych nacięć belki wspornikowej oraz 8 serii dla belki bez nacięcia. Pomiar wykonywany był z synchronizacją fazy wszystkich punktów pomiarowych względem jednego, referencyjnego. Rejestrowane przebiegi czasowe zmian przyspieszeń punktów pomiarowych transformowano do dziedziny częstotliwości. Serie pomiarowe rejestrowano jako spektrum odpowiedzi w dziedzinie częstotliwości dla ośmiu czujników w zakresie częstotliwości od 0 do 1024 Hz. Przy takim paśmie częstotliwości analizator sygnału (12-bitowe karty) umożliwiał rejestrację sygnałów z rozdzielczością 0,25 Hz. Rozróżniono osiem pierwszych częstotliwości rezonansowych, co wynikało z przeprowadzonych rozważań analitycznych i numerycznych dla tego modelu wspornika (gęstość modalna).

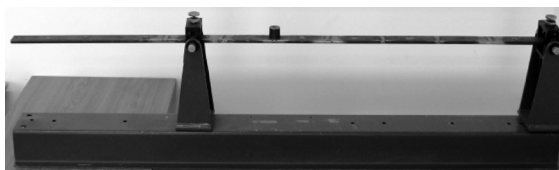
Identyfikacja parametrów modalnych z danych pomiarowych wymagała zastosowania procedury ich estymacji w dziedzinie częstotliwości. W tym celu posłużono się uśrednionym widmem częstotliwościowym z wszystkich punktów pomiarowych. Poszukiwano dla nich biegunów układu drgającego. Działania te wykonywano półautomatycznie, wyszukując wartości maksymalnych amplitud w wydzielonych zakresach częstotliwości. Zakresy dobierano na podstawie modelu numerycznego oraz obserwacji widm. Autorski program wskazywał maksima z uśrednionych modułów części urojonej widma częstotliwości. Zastosowanie półautomatycznej procedury pozwoliło na wyznaczenie parametrów modalnych dla wszystkich serii pomiarowych eksperymentu. W konsekwencji identyfikowano bieguny będące częstotliwościami rezonansowymi  ${}^m\tilde{f}_n$  badanej belki wspornikowej. Na podstawie przeprowadzonych pomiarów, uwzględniając widma amplitudowo-częstotliwościowe dla wszystkich czujników, można odtworzyć formy drgań własnych badanego obiektu. Do dalszych analiz SSN uzyskano 62 wzorce uszkodzenia.

## 2.4. Belka swobodnie podparta z przewieszeniem

W badaniach laboratoryjnych wykorzystano belkę podpartą w sposób przegubowy, umożliwiającą obroty przekrojów w miejscu podparcia (rys. 3) o długości całkowitej  $L$  równej 1500 mm. Model, zamontowany na statywie, wykonano z płaskownika stalowego o wymiarach przekroju: wysokość 10 mm, szerokość 40 mm. Stała długość identyfikowanego uszkodzenia (nacięcia) w modelu laboratoryjnym wynosiła 1,2 mm. Głębokość nacięcia  $h_c$  wykonywano skokowo co 1,0 mm, w zakresie od 1,0 mm do 8,0 mm. Po serii pomiarów dla wszystkich głębokości każdego z położen uszkodzenia (nacięcia) ubytek wypełniano spoiną i szlifowano.

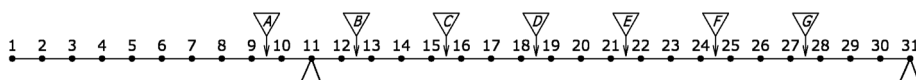
Badania modelu laboratoryjnego wykonano, wykorzystując zestaw pomiarowy zastosowany poprzednio przy badaniach belki wspornikowej. Rejestrowano odpowiedzi dynamiczne konstrukcji, które posłużyły do wyznaczenia wartości ośmiu pierwszych giętych pionowych częstotliwości rezonansowych  ${}^m\tilde{f}_n$ . Wszystkie pomiary realizowano z rozdzielczością pomiarową wynoszącą 0,25 Hz.





Rys. 3. Belka laboratoryjna

Fig. 3. Laboratory beam



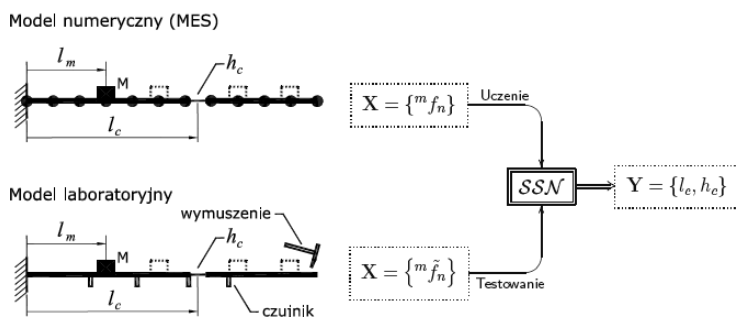
Rys. 4. Schemat wykonywanych nacięć (trójkąty A–G) na belce

Fig. 4. Scheme of notch (triangles A–G) on laboratory beam

Belkę z przewieszeniem podzielono umownie na 30 równych fragmentów o długości 50 mm. Pomiary realizowano dla siedmiu różnych położeń nacięcia, które na rys. 4 oznaczono trójkątami z literami od A do G. Dodatkową, dołączoną z użyciem magnesu, masę przemieszczano po punktach na belce oznaczonych na rys. 4 kropkami. Masę umieszczano w osi belki od góry w 28 punktach od 2 do 10 oraz od 12 do 30. Nacięcie wykonywano w środku każdego z oznaczonych fragmentów belki, swobodnie podpartej z przewieszeniem. Dodatkowa, zmieniająca położenie, masa  $M$  (193 g) stanowiła 4,09% masy badanej belki (4710 g). Ostatecznie zbudowano zestaw danych pomierzonych wartości parametrów modalnych, częstotliwości rezonansowych  ${}^m\tilde{f}_n$  do zastosowania w ocenie stanu belki sieciami neuronowymi. Łącznie dla tej belki dysponowano zestawem danych z 56 wzorcami uszkodzeń.

### 3. Identyfikacja uszkodzenia

Poszukiwanie metod diagnostycznych, niebazujących na parametrach stanu początkowego, może być bardzo użyteczne dla obiektów już istniejących, dla których nie dysponujemy danymi z okresu ich powstania. Prezentowana metoda identyfikacji uszkodzeń, wykorzystująca sztuczne sieci neuronowe, jest modyfikacją metody analizy modalnej. Podstawą identyfikacji uszkodzenia jest założenie, że lokalna zmiana sztywności spowodowana ubytkiem materiału, powoduje zmianę częstotliwości rezonansowych modelu. Drugie wykorzystywane w identyfikacji założenie uwzględnia zmianę częstotliwości rezonansowych wywołane dodatkową masą.



Rys. 5. Schemat metody identyfikacji uszkodzeń [1]

Fig. 5. Scheme of damage identification method [1]

Identyfikacja uszkodzeń metodą prezentowaną na schemacie (rys. 5) przebiega w dwóch etapach. W pierwszym etapie należy zbudować model numeryczny (MES) diagnozowanego elementu. Następnie dla zestawu skończonej liczby przewidywanych stanów uszkodzenia (położenie i wielkość) tego układu należy obliczyć parametry modalne ( $n$  częstotliwości rezonansowych –  $^m f_n$ ) dla  $m$  zmiennych położen  $l_m$  masy  $M$ . Zestaw tak uzyskanych danych numerycznych wykorzystuje się do uczenia SSN. Wektor wejściowy,  $\mathbf{X} = \{^1 \tilde{f}_1, \dots, ^m \tilde{f}_n\}$ , stanowi dobrany zestaw obliczonych częstotliwości rezonansowych. Nauczona sieć pozwala z pewną dokładnością wskazać jednocześnie położenie i wielkość uszkodzenia (wektor wyjściowy

$\mathbf{Y} = \{l_c, h_c\}$ ). W drugim etapie, stosując eksperymentalną analizę modalną, należy określić parametry dynamiczne badanego modelu laboratoryjnego ( $n$  częstotliwości rezonansowych –  $^m \tilde{f}_n$ ). Otrzymane z pomiarów częstotliwości rezonansowe stanowią dane wejściowe (wektor wejściowy  $\mathbf{X} = \{^1 \tilde{f}_1, \dots, ^m \tilde{f}_n\}$ ) do sieci neuronowej wytrenowanej na danych numerycznych. W konsekwencji otrzymujemy przewidywane przez SSN położenie i wielkość uszkodzenia modelu laboratoryjnego.

Przy identyfikacji należy przyjąć procedurę pomiarową dla badanego elementu konstrukcji z uwzględnieniem czasu, kosztów i bezpieczeństwa diagnozowanego układu. W modelu numerycznym należy przede wszystkim uwzględnić rozdzielczość pomiarową dostępnej aparatury, wielkość dodatkowej masy, liczbę dostępnych położen masy na obiekcie oraz minimalny poziom identyfikowanych uszkodzeń. Poziom rozdzielczości pomiarowej można uwzględnić, zaokrąglając wyniki obliczeń numerycznych.

Weryfikacje proponowanej metody w jej pełnej dwuetapowej formie zamieszczono w pracy doktorskiej [1]. Stosowany tam model numeryczny był modelem prętowym. Nacięcie modelowane było elementem o mniejszej sztywności i długości równej długości nacięcia (1,2 mm). Przeprowadzono tam analizę wrażliwości modelu numerycznego ze względu na wielkość dodatkowej masy i wielkość uszkodzenia.

#### 4. Wyniki

Niniejszy artykuł prezentuje wyniki zastosowania SSN tylko z danymi pomiarowymi, tzn. do uczenia i testowania SSN zastosowano wyłącznie dane z pomiarów. Takie podejście ma zweryfikować przydatność SSN jako narzędzia w klasyfikacji wzorców uzyskanych z po-



miarów w kontekście zastosowanej rozdzielczości pomiarowej. W trakcie analiz rozpatrywano różne wielkości wektora wejściowego SSN, uwzględniając różne liczby wykorzystanych położań dodatkowej masy i różne liczby stosowanych częstotliwości. Analiza ta miała na celu określenie korzystnych konfiguracji elementów wektora wejściowego. Prezentowane wyniki predykcji dotyczą jednoczesnej identyfikacji położenia i wielkości uszkodzenia. Dodatkowo, dla porównania, dla obu belek przeprowadzono lokalizację uszkodzeń, stosując metodę modalną znaną z pracy Zhong [8].

#### 4.1. Belka wspornikowa

Z uwagi na niewielką liczbę wzorców uszkodzenia brano pod uwagę jedno, dwa lub trzy położenia masy w kombinacji z jedną, dwoma lub trzema częstotliwościami rezonansowymi. Dla każdej z kombinacji dobierano architekturę SSN. W tabeli 1 zestawiono wyniki identyfikacji uszkodzenia dla kilku rodzajów wektora wejściowego. W tabeli pokazano wartości błędów  $MSE \times 10^{-4}$  dla uczenia ( $MSE_L$ ) i testowania ( $MSE_T$ ) oraz współczynnik determinacji ( $r^2$ ). Wyniki pokazują, że z mniejszym błędem identyfikowana przez SSN jest wielkość uszkodzenia. Można zauważyć, że rozszerzanie wielkości wektora wejściowego poprawia poziom identyfikacji uszkodzenia.

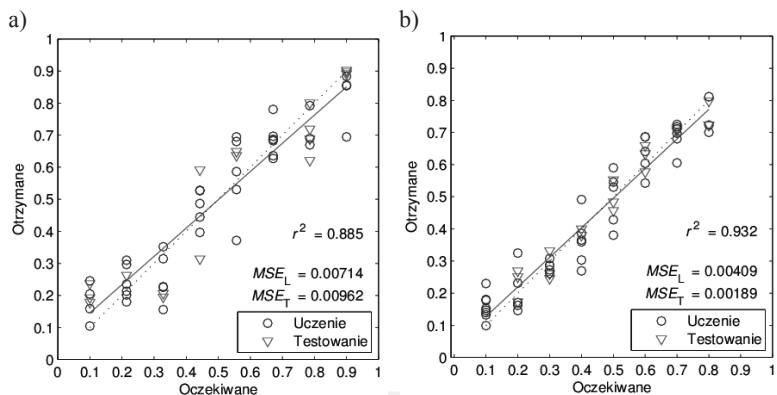
Tabela 1

**Wyniki identyfikacji uszkodzenia dla belki wspornikowej**

Kombinacje i architektura SSN		Położenie uszkodzenia			Wielkość uszkodzenia		
		$MSE_L$	$MSE_T$	$r^2$	$MSE_L$	$MSE_T$	$r^2$
1m 1cz	1-8-2	710,8	262,0	0,283	190,2	63,4	0,701
1m 2cz	2-6-2	418,5	207,9	0,557	41,1	21,9	0,930
1m 3cz	3-5-2	320,9	138,1	0,678	54,8	17,4	0,915
2m 1cz	2-7-2	471,3	105,8	0,554	203,6	46,9	0,693
2m 2cz	4-5-2	176,2	167,5	0,785	45,6	39,1	0,913
3m 1cz	3-5-2	202,3	162,3	0,820	50,6	37,5	0,852
3m 2cz	6-4-2	71,4	96,2	0,885	40,9	18,9	0,932

Najlepsze wyniki dla belki wspornikowej uzyskano dla wektora wejściowego SSN o elementach  $\mathbf{X} = \{\tilde{f}_{3,}^{7, 21} \tilde{f}_{3,}^{22} \tilde{f}_{3,}^{7} \tilde{f}_{7,}^{21} \tilde{f}_{7,}^{22} \tilde{f}_{7,}^{7}\}$ , czyli trzecia i siódma częstotliwość rezonansowa dla masy w punktach 7, 21 i 22. Wyniki szczegółowe predykcji dla tego przypadku pokazano na rys. 6. Wykres po lewej stronie przedstawia identyfikację położenia uszkodzenia, a po prawej identyfikację wielkości. Na osiach poziomych zestawiono wartości rzeczywiste uszkodzeń, a na osiach pionowych wartości obliczone przez SSN. Skala wykresu identyfikacji położenia jest normowana względem długości belki, natomiast skala wykresu wielkości uszkodzenia skalowana jest względem wysokości belki. Okręgi przedstawiają wzorce uczenia, a trójkąty wzorce testowania.

W celu porównania wyników identyfikacji przez SSN z metodą lokalizacji uszkodzenia prezentowaną przez Zhong [8] wykorzystano zebrane dane pomiarowe. Po analizie skutecznie udało się zlokalizować tylko jedno najgłębsze uszkodzenie (punkt C na rys. 2) z 62 branych pod uwagę.

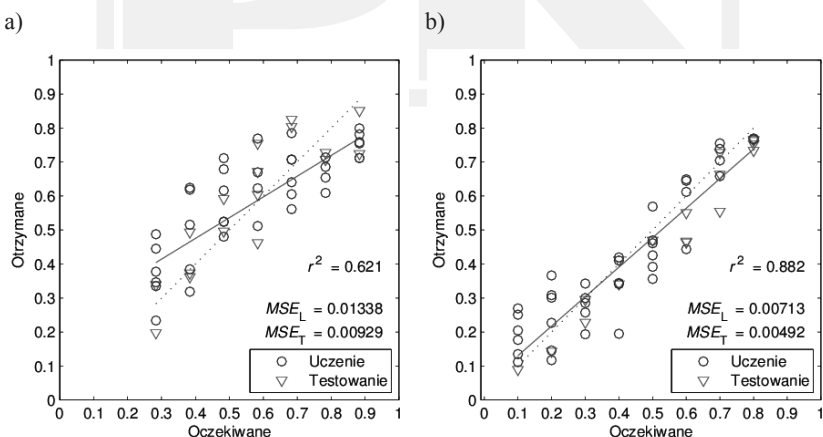


Rys. 6. Identyfikacja uszkodzenia z zastosowaniem SSN: a) położenie, b) wielkość

Fig. 6. Damage identification: a) location, b) extent

#### 4.2. Belka swobodnie podparta z przewieszeniem

Dla drugiej badanej belki laboratoryjnej także przeprowadzono procedurę wyboru korzystnych położen mas i doboru stosowanych przy identyfikacji liczby częstotliwości rezonansowych. Powtórzyła się właściwość, że identyfikacja wielkości uszkodzenia była obciążona mniejszym błędem jak identyfikacja położenia. Najlepsze wyniki dla drugiego z analizowanych modeli belki uzyskano dla wektora wejściowego SSN o elementach odpowiednio  $\mathbf{X} = \{^7\tilde{f}_6, ^{19}\tilde{f}_6, ^{21}\tilde{f}_6, ^7\tilde{f}_7, ^{19}\tilde{f}_7, ^{21}\tilde{f}_7\}$ , czyli szоста i siódma częstotliwość rezonansowa dla masy w punktach 7, 19 i 21. Szczegółowe wyniki predykcji dla tego przypadku pokazano na rys. 7. Porównawczo zastosowano metodę prezentowaną przez Zhong [8] i dla tej belki udało się skutecznie zlokalizować tylko dwa położenia (punkty C i D na rys. 4) uszkodzenia z 56 – były to te największej wielkości.



Rys. 7. Identyfikacja uszkodzenia z zastosowaniem SSN: a) położenie; b) wielkość

Fig. 7. Damage identification: a) location; b) extent

## 5. Wnioski

Prezentowana metoda identyfikacji uszkodzeń, bazująca na zmianach parametrów modalnych spowodowanych zmieniającą położenie dodatkową masą, pozwoliła na identyfikację uszkodzeń (położenie i wielkość) w badanych belkach laboratoryjnych. Zastosowanie SSN do analizy danych pomierzonych na belkach w laboratorium umożliwiło skuteczne rozróżnienie położenia oraz wielkości uszkodzenia. O dokładności identyfikacji w głównej mierze zadecydowała zastosowana rozdzielczość pomiarowa (0,25 Hz). Precyzja lokalizacji SSN nie jest duża, ale pozwala myśleć perspektywnie o jej poprawie. Zwłaszcza biorąc pod uwagę wyniki symulacji numerycznych [1], uwzględniających zmianę rozdzielczości pomiaru z 0,25 Hz na 0,10 Hz, co poprawiało jakość identyfikacji, zmniejszając błędy średniokwadratowe o połowę. Oczywiście wiąże się to z koniecznością powtórzenia pomiarów z analizą węższego pasma lub zastosowanie dokładniejszej aparatury. Dla obu belek wielkość uszkodzenia była identyfikowana z mniejszym błędem niż położenie tego uszkodzenia. Sugeruje to większe zmiany parametrów modalnych wywołanych zmianą wielkości uszkodzenia niż zmianą jego położenia. Na uwagę w przeprowadzonych badaniach zasługuje fakt, w świetle rozwoju metod diagnostyki, że uzyskano metodę identyfikacji, bazując na metodzie lokalizacji [8] o większej skuteczności lokalizacji.

*Praca została wykonana w ramach grantu Nr N N501 134336, Analiza i porównanie metod pomiarowych oraz algorytmów przetwarzania danych (ze szczególnym uwzględnieniem metod sztucznej inteligencji) do identyfikacji uszkodzeń konstrukcji, finansowanego przez Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego.*

## Literatura

- [1] Borowiec A., *Wykrywanie uszkodzeń w układach prętowych z wykorzystaniem zmian parametrów modelu modalnego*, rozprawa doktorska, Wydział Budownictwa i Inżynierii Środowiska, Politechnika Rzeszowska, 2009.
- [2] Borowiec A., Ziemiański L., *Ocena stanu konstrukcji belkowych na podstawie zmiany parametrów modalnych wywołanych dodatkową masą*, Zeszyty Naukowe PRz: Mechanika 74, 2008, 9-16.
- [3] Carden E.P., Fanning P., *Vibration based condition monitoring: A review*, Structural Health Monitoring, Vol. 3, 2004, 355-377.
- [4] Dems K., Mróz Z., *Identification of damage in beam and plate structure using parameter dependent frequency changes*, Engng. Comput., Vol. 18, 2001, 96-120.
- [5] Doebling S.W., Farrar C.R., Prime M.B., *A summary review of vibration-based damage identification methods*, The Shock and Vibration Digest, Vol. 30, 1998, 1-34.
- [6] Maciąg E., Kuźniar K., *Zastosowanie SSN w wyznaczaniu wpływu parametrów wstrząsów górniczych na interakcję dynamiczną grunt-budynek*, Wydawnictwo Politechniki Białostockiej, Budownictwo, Zeszyt 28, tom 2, 2006.
- [7] Waszczyszyn Z., Ziemiański L., *Neural Networks in Mechanics of Structures and Materials – New Result and Prospects of Applications*, Computer & Structure, Vol. 79, 2001, 2261-2276.
- [8] Zhong S., Oyadji S.O., Ding K., *Response-only method for damage detection of beam-like structures using high accuracy frequencies with auxiliary mass spatial probing*, Journal of Sound and Vibration, Vol. 311, 2008, 1075-1099.